

### 3. 平成 24 年度の成果の概要

#### 3-1. 地震・火山現象予測のための観測研究の推進

##### (1) 地震・火山現象のモニタリングシステムの高度化

地震現象と火山噴火現象の理解を深めるとともに、それらの予測精度の向上を目指し、日本列島全域に高密度な地震・地殻変動等の観測網、及び全国の主な火山に地震・地殻変動・重力等の火山活動観測網が整備されてきた。これらの観測網を着実に維持・更新し、得られたデータを活用した地震活動・地殻変動及び火山活動のモニタリングが進められた。さらに、諸観測網の高密度化及び多項目化といった整備・強化、新たな観測・解析手法の導入、観測データの準実時間での処理システムの開発と運用といったモニタリングシステムの高度化を図る研究が進められた。各種の観測によって得られた成果は、随時、地震調査委員会や地震予知連絡会・火山噴火予知連絡会などに提供され、会報にまとめられているほか、各機関などのウェブで公開した。

##### ・日本列島域

巨大地震に対応できるように、地震のモーメントテンソル解を長周期地震波を用いて完全自動で決定する手法の改良を進めた。また、気象庁等の震源情報を利用して、GEONET による 1 秒ごとの地殻変動データを用いて地震発生後 10 分以内にモーメントマグニチュード(Mw)を推定することができることを確認した。

##### ・地震発生・火山噴火の可能性の高い地域

東北地方太平洋沖地震の本震破壊域の最北部にあたる岩手沖の海域で海底地震計を用いた余震観測を実施し、震源決定を行った。東北地方太平洋沖地震の本震・余震時の破壊域と比較すると、本震・余震時に滑りが大きかった領域で余震活動が低いことが明らかとなった。高密度の首都圏地震観測網(MeSO-net)で得られたデータを解析することにより、千葉県中部下のフィリピン海プレート下面が太平洋プレートと接する場所は、顕著な減衰域であり高  $V_p/V_s$  (P 波速度/S 波速度) 領域であることが分かった。阿蘇火山中岳火口周辺において比抵抗モニタリングを実施した結果、2011 年 4 月～7 月の地下 200～300 m における比抵抗変化は、小噴火に先立つ深部からの火山ガス供給の増加と小規模噴火発生後のガス供給の減少によるものと推察された

##### ・東海・東南海・南海地域

東北地方太平洋沖地震後の地殻変動は地震発生時の地殻変動と比較して南北での変動量の差が小さかった。これは、本震の断層運動による地震時の地殻変動よりも、地震後に余効滑りや粘性緩和を起こしている領域の方が広いことによると考えられる。また、東北地方太平洋沖地震後の地殻変動により、静岡県北部から長野県にかけて面積ひずみ増加、静岡県南部地域では面積ひずみ減少がみられた。これは東北地方太平洋沖地震の余効変動や粘性緩和によって説明できる。

##### (2) 地震・火山現象に関する予測システムの構築

地震発生予測システムの構築を目指して、地震発生とその準備過程の物理的理解に基づく地殻活動予測シミュレーションによる予測を実現するための研究と、地震活動の統計モデル・物理モデル

に基づく地震活動予測の高度化のための研究を推進している。これらの目的のために、地殻活動予測シミュレーションモデルの開発と高度化、観測データをシミュレーションに反映するためのデータ同化手法の開発、地震活動予測手法の開発と高度化を行った。

## (2-1) 地震発生予測システム

### ・地殻活動予測シミュレーションとデータ同化

巨大地震の発生が懸念される南海トラフを対象として、近年の地震波構造探査等によって明らかになった沈み込みプレート境界の形状や物性値の詳細な分布を利用してシミュレーション研究を実施した。プレート境界浅部の滑り挙動の摩擦パラメータに対する依存性を調べたところ、ある値を境としてプレート境界浅部の挙動が大きく変化することが分かった。また、南海トラフで発生する巨大地震と内陸部の地震活動との相互作用をシミュレーションにより調べた。その結果、内陸部では、南海トラフ巨大地震の発生前に逆断層型地震が、発生後に横ずれ型地震が多くなること、逆に、内陸部で大地震が発生したことによる応力擾乱（じょうらん）がプレート境界地震の発生に影響を与える可能性が示された。

巨大地震の発生サイクルを再現するため、大規模計算を効率よく行う手法の改良を行った。また、現実 に即したシミュレーションを行うため、観測データを用いてシミュレーションに必要な物理量を推定する手法や、逐次的なデータ解析により、シミュレーションを現実の変化に追従させるデータ同化手法の開発を進め、数値実験を行った。

### ・地殻活動予測シミュレーションの高度化

巨大地震発生時の大きな滑りを説明するメカニズムとして提案されている、地震時の摩擦発熱による間隙流体圧の上昇の影響を考慮したシミュレーションを行った。その結果、この効果が働く領域の深さや間隙流体拡散係数の大きさが、地震時の滑りや応力降下量、地震発生間隔に影響を与えることを示した。また、浅部に大規模なアスペリティを設定し、摩擦発熱による間隙流体圧の上昇の影響を考慮した東北地方太平洋沖地震を対象とした三次元モデルを構築し数値シミュレーションを行ったところ、M7クラスとM9クラスの地震を含む複雑なサイクルが再現できることが分かった（図5）。さらに、断層に沿った流体の移動を考慮した理論に基づくシミュレーションで、ゆっくり滑り、及びゆっくり滑りと同期し逆方向に移動する微動源を再現した。

### ・地震活動評価に基づく地震発生予測

将来の地震活動を統計モデル・物理モデルに基づいて予測する手法を統一的に比較・検証するために、地震活動予測に関する国際研究プロジェクト(Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability:CSEP)と連携し、検証に用いるデータベース等の共通基盤の整備、地震発生予測手法の開発及び異なる予測手法間の比較実験を行った。日本周辺の地震活動は、局所的な活動が発生しやすいことから、地震の空間分布予測性能を評価する手法を新たに開発し、評価指標として役立つことを確認した。

## (2-2) 火山噴火予測システム

噴火の時期や場所についての予測は、十分に観測体制が整備されていればある程度可能な状況である。しかし、一旦開始した噴火の規模・様式・推移を予測することは、現在の火山学的知識ではまだ不十分である。そこで、実際の噴火を予測することを目指し、過去の噴火履歴を基に将来発生

する可能性のある噴火事象をできる限り網羅し、これまで培ってきた火山学的な知見を総動員しながら、ある程度の確度を付した噴火事象系統図（イベントツリー）、すなわち、噴火シナリオの作成を進めた。

#### ・噴火シナリオの作成

本年度はより爆発的噴火を起す可能性のある流紋岩～デイサイト火山の例として有珠山を対象とした。有珠山では、7～8千年前の山体崩壊の後、1663年から噴火活動が発生し合計8回の噴火が起きている。それぞれの噴火は、古記録や地質調査結果による噴火履歴に関する十分な量のデータがそろい、かつ、最近の4噴火については地震活動や地殻変動観測を中心とした観測データがある。これらのデータから、有珠山の噴火は約30年 $\pm$ 4年の間隔で発生すること、噴火の規模と頻度には良い負の相関があること、山頂噴火と山腹噴火で噴火の規模や推移に明瞭な違いがあることが明らかとなったこれらの結果を基に、確度を付した有珠山の噴火シナリオを作成した（図6）。

#### ・噴火シナリオに基づく噴火予測

これまでに霧島山と桜島について噴火シナリオを試作し、これに基づいて推移予測を試みた。しかし、噴火事象の分岐に対する考え方が未成熟であったため、十分な推移予測はできなかった。本年度は、山頂噴火と山腹噴火で地震の発生パターンに違いがある有珠山について、観測データに基づいた噴火事象分岐が可能か検討した（図7）。山頂噴火では地震活動が加速して噴火に至る。一方、山腹噴火では地震活動が一旦ピークを過ぎてから噴火が起きる。これは、ゆっくり上昇したマグマが一旦、地下3～4kmの深度で浮力を失い、地震を伴って横移動し、その後、遅延発泡して、柔らかい地層中を上昇・噴火したと理解できる。このことは、有珠山では、地震活動の様式やマグマ上昇速度をもとに山頂噴火と山腹噴火の分岐の判断ができることを示唆している。

### （3）地震・火山現象に関するデータベースの構築

地殻活動予測シミュレーションモデルの開発のためには、その基礎となるデータが必須である。地震現象や火山現象に関する予測のために必要な「基礎データベース」を構築するとともに、それらに関する情報の統合化を図り、地殻活動予測シミュレーションモデルの構築に資するための「統合データベース」の構築を進めた。

#### ・地震・火山現象の基礎データベース

高感度地震観測網、広帯域地震観測網、強震観測網等による地震波形データベース、全国の地震カタログ、更にはGPS観測データや潮位観測データのデータベース等の基礎データ群を利用した研究により、東北地方太平洋沖地震以降の地殻活動の理解が進展した。全国ひずみ・傾斜データの流通と一元化の作業が進められると同時に、これらのデータを使用して、巨大地震の発生時に即時に地震の規模を推定する手法の開発も開始した。

#### ・地震・火山現象に関する情報の統合化

諏訪之瀬島火山と桜島火山の火山地質図を完成させるなど、将来噴火の可能性の高い活動的な火山について、火山地質図の整備や、噴火シナリオの作成・高度化等の作業を行った。南海トラフや西南日本内陸等を初めとする各地を対象とした地殻活動シミュレーションや強震動予測シミュレーション等に資するため、既存研究成果の数値化を行い、日本列島の地殻構造データベースのプロ

トタイプの構築を進めた。

### 3-2. 地震・火山現象解明のための観測研究の推進

#### (1) 日本列島及び周辺域の長期・広域の地震・火山現象

日本で地震や火山噴火が発生するのは、日本列島がプレート沈み込み帯に位置しているためであるが、プレートの沈み込みによって地震・火山噴火が生じる機構は完全には解明されていない。日本列島及びその周辺域で、長期的なプレート運動とそれに伴う応力場を明らかにし、上部マントルにおける水の供給・輸送過程とマグマの生成・上昇機構を明らかにする必要がある。さらに、これらの流体と地震・火山噴火発生との関係を解明することが重要である。そのためには、マグマ等の地殻流体の分布を含む広域の地殻・上部マントル構造を明らかにするとともに、地震活動と火山活動の相互作用に関する研究を進めた。さらに、地震現象の予測精度向上に不可欠な地震発生サイクルに関する理解を深めるために、アスペリティやセグメントの破壊様式についての過去の活動履歴を明らかにすると同時に、長期的な内陸の地殻ひずみの時空間分布を調べた。

#### ・列島及び周辺域のプレート運動，広域応力場

地震波形のインバージョン解析や地震前後の発震機構の変化等から、2011年東北地方太平洋沖地震では、プレート境界面上に蓄えられたほとんど全てのひずみが解放されたと考えられる。応力降下量の見積りなどから絶対応力レベルを推定すると、海溝から震源付近までの領域でせん断応力は約10MPaと求まった。プレート境界面上ではほぼ全てのひずみを解放するには、摩擦発熱による間隙流体圧の上昇など、摩擦力を極端に下げる何らかのメカニズムが必要であることが分かった。

#### ・上部マントルとマグマの発生場

火山岩及び地下水・温泉・熱水系の調査・サンプリングに基づき、テクトニックな背景とスラブ流体の起源の関係性を明らかにした。特に中部地方に産出する火山岩について、流体量の制約と、数値シミュレーションを合わせて、太平洋プレートとフィリピン海プレートの二重のスラブ沈み込み帯でのマグマ生成過程の定量的モデル化に成功した。

#### ・広域の地殻構造と地殻流体の分布

濃尾地震断層周辺域について比抵抗構造を求めた結果、断層域直下の中部地殻は高比抵抗域と推定された。跡津川断層周辺域での構造研究は、地震発生域は高地震波速度・高比抵抗であることを示しており、流体が存在することは考えにくい。このことから、濃尾地震の断層が伸びた南南東方向に断層運動の障壁となる流体存在域がなかったことが、濃尾地震がM8クラスの大地震になった要因であると推察された。

#### ・地震活動と火山活動の相互作用

九州全域において、地下深部の構造の境界面を容易に検出できる変換波を利用した地震波速度構造解析（レシーバ関数解析）を行ったところ、布田川・日奈久断層に平行な帯状の領域でモホ面が周囲よりも5-10km浅いことが分かった（図8）。この帯状の領域は、一方の境界が布田川・日奈久断層であり、別府-島原地溝がこの領域内に存在する。今回の解析結果は、重力から推定されたモホ面深度の結果と調和的である。この帯状の領域の直下では、マントルの上昇流が存在する可能性が

ある。ただし、レシーバ関数解析によるモホ面深度の特徴は、別府-島原地溝帯の東部（別府地域）における地震発生層の厚さや応力・ひずみ分布とは調和的であるが、地溝帯西部とは必ずしも整合的ではないように見えるため、今後更なる検討と総合モデルの構築が必要である。

#### ・地震発生サイクルと長期地殻ひずみ

糸魚川-静岡構造線活断層系中部の塩尻峠周辺には、北西-南東走向の左横ずれ断層が複数並走する。塩尻峠の南側に位置する岡谷市西山地点においてトレンチ調査を実施した。現在、年代測定を実施中であり、その結果に基づき活動時期と回数を推定し、本断層と並走又は延長上に位置する他の活断層で報告されている活動時期との関係について検討する。

## （２）地震・火山噴火に至る準備過程

### （２－１）地震準備過程

地震発生準備過程を解明するために、地殻とマントルで応力が特定の領域に集中し地震発生に至る過程を明らかにする。プレート境界地震に関しては、プレート境界の固着状態の把握やプレート境界におけるゆっくり滑りの時空間的推移、プレート境界近傍の地震発生場における応力状態などを解明する。内陸地震に関しては、広域の応力によって非弾性的な変形が進行して、特定の震源断層に応力が集中する過程を、新潟-神戸ひずみ集中帯や近年発生した内陸大地震発生域などにおける詳細な媒質構造不均質性及び応力場、ひずみ速度場などの特性を明らかにして定量的にモデル化する。また、スラブ内地震については、スラブ内の震源分布や地震波速度構造を詳細に推定し、スラブ内に取り込まれた流体の分布・挙動と地震発生機構の解明を図る。

#### ・アスペリティの実体及び非地震性滑りの時空間変化とアスペリティの相互作用

2011年東北地方太平洋沖地震の発生前のプレート間非地震性滑りについて、小繰り返し地震による解析を行った結果、本震時の大滑り域を含む領域では、その南北の隣接領域に比べて、プレート境界のより深部（50-60km付近）まで小さい滑り速度を示していたことが分かった。南西諸島沖においても同様の解析を行い、1911年の喜界島近海の巨大地震（M8.0）の滑りが大きかった領域ではプレート境界の深部まで非地震性滑り速度の小さい領域が存在することが分かった。これらの巨大地震の発生域では、周囲よりも深くまでプレート境界が固着していた可能性がある。

2011年東北地方太平洋沖地震の震源域直上に設置された海底圧力計及び陸上沿岸部の体積ひずみ計で、2011年1月下旬から非地震性の地殻変動が観測された（図9）。これらの地殻変動が沿岸部のGNSS観測点では観測されなかったことも考慮し、地震モーメント  $3.6 \times 10^{19} \text{Nm}$  (Mw7.0) のゆっくり滑り（100km×35kmの矩形断層上での40cmの逆断層滑り）が発生していたことが推定された。このゆっくり滑りは少なくとも3月9日の最大前震直前まで継続していたように見える。また、観測記録の変化から、ゆっくり滑りの断層の上端部は、2月下旬から3月9日の地震発生直前にかけて、海溝軸の方向に拡大していた可能性がある。また、このゆっくり滑りの発生域では、2月中旬頃からM5程度の地震が頻発した。

GNSS連続観測により、四国、紀伊半島、東海地方に加えて、日向灘から種子島にかけての領域と相模トラフ沿いにおいて、短期的なゆっくり滑りの発生を示唆する地殻変動を多数検出した。さらに、それらの断層モデルの推定により、短期的なゆっくり滑りの規模、繰り返し周期、発生する深さの地域的な特徴を明らかにした。

東北地方太平洋沖において、浅部超低周波地震は岩手沖、宮城沖、福島・茨城沖の三つの領域でクラスター状に発生していたが、2011年東北地方太平洋沖地震後に岩手沖及び福島・茨城沖の活動が活発化したのに対し、宮城沖については地震後に活動が検出されていないことが分かった。千島海溝―日本海溝会合部付近においては、1994年三陸はるか沖地震の直前・直後に目立った超低周波地震活動はなかったこと、その後、2003年十勝沖地震発生までの1996～2002年の期間には約10.5か月間隔で超低周波地震が発生していたことが明らかとなった。この期間における超低周波地震活動の多くは北東方向に移動し、逆方向の移動が卓越した2003年十勝沖地震後の活動とは対照的である。

北海道太平洋岸～沖縄の8地域において、絶対重力の連続測定を行っている。琉球弧の西表島では、約半年ごとに発生する2回のゆっくり滑りに伴って、約4マイクロガルの減少を観測した。これはゆっくり滑りの発生時に高圧間隙水が拡散した可能性を示す。

### ・ひずみ集中帯の成因と内陸地震発生の準備過程

濃尾地震震源域の総合集中観測により地震波トモグラフィ解析を行い、濃尾地震震源域及びその北西側の下部地殻はP波、S波とも周囲に比べ低速度であること、その中でも特に、濃尾地震の際に滑り量が大きかった温見断層直下の下部地殻の速度が遅いことなどを明らかにした。人工地震実験データの解析から、反射波群の上面(28-32km)と下面(37-41km)の深さは根尾谷断層帯を境に北東側の方が深いことが明らかになった。これは、根尾谷断層帯が下部地殻にまで及んでいる可能性を示す。比抵抗構造の3次元解析からは、濃尾地震断層帯南部(深さ4km程度までの浅部)に沿った低比抵抗帯の存在、福井―岐阜県境域上部マントルに東西に横たわる低比抵抗帯の存在が推定された。後者は、深さ100km以深にまで達しており、その生成には太平洋プレートからの脱水が関与している可能性がある。

2008年岩手・宮城内陸地震の詳細な前震・本震・余震分布と震源域周辺の数値構造を推定し、本震断層面(逆断層)の上盤側は低速度、下盤側は高速度で過去の正断層運動を示唆すること、震源域の深部には低速度異常域が分布し、その震源域走向方向の広がりには本震震源断層の広がりに対応することなどを明らかにした。地殻下部の弱い領域(弱体)の広がりが地殻上部における震源域の広がりを規定していた可能性がある。

2007年能登半島地震の震源域について、断層の深部延長の滑りによるモデル化を行い、余震の発震機構解に調和的な深部で逆断層的、浅部で横ずれ型の応力場を再現できることが分かった。また、能登半島地震の震源域では、下部地殻内の低速度・低比抵抗領域から推定される弱体は震源域を越えて続いていると推定されるのに対して、跡津川断層帯においては、下部地殻内の低速度・低比抵抗領域は大規模であり、深部延長だけでなくその両端部を含めて弱体となっており、新潟―神戸ひずみ集中帯の走向方向の弱体のつながりが、ひずみ集中帯の形成に関係している可能性が明らかになった。島根県東部の定常的な地震活動帯において応力逆解析を行い、地震帯中央部での圧縮応力がかかる方向が変化し、それが地震帯深部延長における滑りで説明可能であることを示した。日本海東縁ひずみ集中帯で観測される顕著な短縮変形と長波長の沈降について、表層を持つ上部地殻(弾性層)と下部地殻・マントル(粘弾性層)を仮定した運動学的なモデルにより再現できることが分かった。また、東北地方太平洋沖地震時に越後平野周辺において観測された、周辺より大きい東西伸張ひずみについては、この地域の地盤構造モデルに基づく地殻不均質構造を利用して変形のシミュレーションを行い、その地殻変動の特徴を再現できることを示した。

## ・スラブ内地震の発生機構

東北地方において、スラブ内地震で観測される太平洋プレート上面での PS 変換波を用いて、海洋性地殻の P 波速度構造を推定した。その結果、P 波速度は火山フロント下を境に大きく変化すること、深さ 70-90km の範囲では岩石学的モデルや室内実験から期待される速度よりも 10%程度遅く、含水鉱物に加えて多量の水が存在する可能性が示された。また、海洋性地殻内で地震活動が活発な上面地震帯はこの低速度領域と良い対応を示すことから、海洋性地殻内で発生する地震は、含水鉱物の脱水によって生じた高間隙圧水に起因するというモデルが支持される。

新潟県新発田市付近の深さ約 155km で発生している稍(やや)深発地震について波形解析を行い、これらは太平洋スラブの地殻内に発生する複数のクラスター活動であること、正断層地震のクラスターは逆断層地震のクラスターより約 1km 浅部で発生していることなどを明らかにした。近接するクラスター間で応力場が急変していることは、海洋性地殻が高圧下で相転移する際の体積減少に伴い、浅部に引張場、深部に圧縮場を形成すると考えることにより説明可能である。

## (2-2) 火山噴火準備過程

火山噴火予知研究の目標は、噴火の時期、場所、規模、様式及び推移を予測することである。現状では、研究が進んでいる幾つかの火山において、観測と経験則により異常の原因が推定できる段階になっている。これを、現象を支配する物理・化学法則を明らかにし、それに基づいたモデルと観測結果を合わせて将来の予測ができる段階に引き上げることを目指している。本研究項目では、噴火に至るまでの現象を理解するため、マグマ上昇・蓄積過程の解明と、地質学的研究による噴火履歴、及びマグマの発達過程の解明を 2 本の柱として研究を推進している。

## ・マグマ上昇・蓄積過程

これまでの研究により、火道が開口系であるか非開口系であるかにより、マグマ上昇・蓄積過程に対応する地殻変動の様式には多様性があることが示された。非開口系の場合にはマグマの蓄積がそのまま地殻変動に現れる一方、開口系の場合には火山ガスやマグマの放出により地殻変動の変化量が小さく、明瞭でない場合が多い。

開口系であると考えられている桜島では、長期的なマグマ貫入と蓄積による地殻変動の空間的なパターンが時期により変化していることが明らかになった。桜島の地殻変動を励起する二つの圧力源は、始良カルデラ下と桜島の中央火口丘下にある。GNSS 観測から、後者は、2009 年 10 月～2010 年 3 月の変動では球状圧力源で近似できる一方、2011 年 11 月～2012 年 3 月の変動は開口割れ目でモデル化する方が妥当であることが示された(図 10)。また、噴火に前駆する圧力源の体積変化量とその変化速度が、噴火の規模を判断するための指標となる可能性を示す観測データが得られた。例えば、2012 年 7 月 24 日の噴煙高度 5000m 以上、30 万トンの火山灰を放出した南岳からの爆発は、その 21 時間前から捉えられた隆起・膨張を説明する圧力源の体積増加は  $1 \times 10^5 \text{m}^3$  であった。これは、昭和火口からの爆発に前駆する体積変化量の  $10^3 \sim 10^4 \text{m}^3$  よりも 1 桁以上大きかった。このことは、地殻変動観測が噴火規模の予測に役立つ可能性を示している。

## ・噴火履歴とマグマ発達過程

桜島の噴火活動は 2009 年から活発化し、それと同時に、これまで低調であったマグマの供給率が桜島の過去 100 年間の活動の平均的なレベルまで回復した。また、それに前駆し、温泉ガスに含まれる水素、二酸化炭素が急激に増加し、噴出物の中の玄武岩質マグマの成分が増加した。さらに、

火山灰に付着する塩素/硫黄の分子比、及び亜硫酸ガスの放出量は長期的に増加傾向にある。これらは、高温のマグマが浅部まで上昇し、しかもその量が増加していることを意味しており、噴火活動が継続したことによる火道の拡大を反映していると考えられる。

幾つかの火山で、噴火史及び噴火推移と物質科学解析によるマグマ系変遷の解明が進んだ。北海道駒ヶ岳のマグマ溜まりは、二つの異なったマグマから成り、固まりかけたマグマ溜まりに新たな高温マグマが地下から入って来たと考えられる。現在、この高温マグマは、ほぼ噴火により噴出しつくし、マグマ溜まり全体も更に温度が下がり、固結が進んでいると考えられる。このことから、北海道駒ヶ岳では噴火能力が弱まっていると判断できる。那須岳においては、最新のマグマ噴火である 1408～1410 年噴火について詳細な噴火履歴を明らかにし、ブルカノ式噴火活動中にマグマの組成が変化したことなどが明らかとなった。これらの結果は、マグマの成分の分析により、次のマグマ活動の様式が推定できる可能性を示す。

### (3) 地震発生先行・破壊過程と火山噴火過程

#### (3-1) 地震発生先行過程

地震発生の予測の時間精度を高め、短期予測を可能にするためには、地震発生の直前に発生する非可逆的な物理・化学過程(直前過程)を理解して、予測シミュレーションモデルにそれらの知見を反映させ、直前過程に伴う現象を的確に捕捉して活動の推移を予測する必要がある。これまでの研究によって、地震に先行して発生する現象は多種多様であり、地震発生準備過程から直前過程にまたがって発生する現象の理解を進める必要性が認識されてきた。このために、地震に先行する地殻等における諸過程を地震発生先行過程と位置付けて研究し、そのメカニズムを明らかにして、特定の先行過程が地震準備過程や直前過程のどの段階にあるのか評価することが重要である。

#### ・観測データによる先行現象の評価

大地震によるクーロン破壊関数の静的変化( $\Delta CFF$ )で、周辺の地震活動の変化がどの程度予想できるかを厳密に検討するために、大地震の前と後に実際に起こった地震の発震機構を調べて、それが $\Delta CFF$ と調和的であるかを検討した。2011年東北地方太平洋沖地震後に関東地方で発生した地震について調べた結果、多くは東北沖地震による $\Delta CFF$ で説明が可能であるが、動的応力変化、流体圧変化、余効(よこう)滑りなどの影響を考慮しなければ説明できないものも存在することが分かった。東北地方のプレート境界地震の滑りベクトルを調査し、東北地方太平洋沖地震前にプレート境界での局所的な固着によりその周囲のプレート境界での滑り方向が回転していた可能性を示す結果を得た。

#### ・先行現象の発生機構の解明

これまでの伊豆諸島での地電位観測で、地震の発生場所によって地電位変動の極性が決まっていることなどが見つかっている。地殻内の電気伝導度の不均質を仮定して、地電位変動の数値計算を行った結果、ある程度観測事実を説明できる結果を得た。今後は解析から推定された地下の電気伝導度の不均質構造が実際に存在するかどうかを調査していく必要がある。

大きなアスペリティの中に、部分的に弱い小アスペリティがある場合の大地震の準備過程について調べた。小アスペリティが小さいときは、ほとんどの大地震が大アスペリティ自体の震源核が大



大きく成長するという準備過程を経てから発生する。小アスペリティが大きくなるにつれて、大アスペリティ自体の震源核が成長するより先に小アスペリティで地震が起こり、それが大アスペリティの破壊を励起して全体が壊れてしまうケースが増える（図11）。

### （3-2）地震破壊過程と強震動

地震や津波の観測データの解析に基づき、大地震の震源破壊過程を詳しく調べることは、大地震の発生過程と強震動の生成過程の理解を深め、将来の大地震の強震動と津波の発生予測の高度化につながる。また、断層面上の大滑り域や強震動生成域を知ることは、地震ごとの繰り返し性を考えると地震発生予測に向けた重要な基礎データとなる。さらに、大地震発生直後に観測データを即時解析し、震源域の広がりや破壊過程を正確に求めることにより、強震動の面的広がりや沿岸の津波到達・浸水の予測が可能になる。

#### ・断層面の不均質性と動的破壊過程

2011年東北地方太平洋沖地震の本震から30分後に茨城県沖においてM7.6の余震が発生した。この地震の断層面上の滑り分布を、強震計の波形とGNSSデータを用いて調べたところ、この断層面の大きな滑りの領域は震源から南東方向に約20kmの浅い領域に位置し、その大きさはほぼ60km×30kmであることが分かった。この領域は沈み込むフィリピン海プレートの北東限と沈み込む海山に囲まれた場所に位置する（図12）。この地震の破壊の伝播がフィリピン海プレートと海山によって止められたように見え、大地震の発生場所と規模（震源域の広がり）を海底地形やプレート構造などの地学的要因からと関係する可能性があることが分かった。

#### ・強震動・津波の生成過程

津波の即時予測のための研究では、既存のGPS波浪計や海底圧力計に加え、海溝軸を越えた沖合に津波観測点を数点増強するだけで、波源域の推定と、北海道～房総半島沖の沿岸津波到達予測の精度が大きく向上することが示された。現在の沿岸津波観測点は大地震が発生する海溝（トラフ）側から見て一方向にしかないため、波源の広がりを正しく推定するためには震源を取り囲むような観測網の増強が有効である。

詳細な震源モデルを推定するためには、近地強震計記録の短周期成分を用いた解析が必要になり、不均質な地下構造の影響を考慮する必要がある。三次元的に不均質な地殻・マントル構造とプレート構造での波動伝播を考慮したモデルに基づき、東北地方太平洋沖地震と1995年兵庫県南部地震の震源過程の詳細な再解析が行われた。

### （3-3）火山噴火過程

噴火規模や様式、噴火推移を支配する要因を理解するためには、火道浅部におけるマグマの挙動や火山体構造の状態を把握し、それらと噴火規模や様式との関係を明らかにすることが必要である。このような観点から、本計画では、繰り返し発生する噴火を対象として集中的な地球物理学・物質化学的観測を行い、噴火機構のモデル化を図る。

#### ・噴火機構の解明とモデル化

諏訪之瀬島の臨時地震観測点等の波形データ解析から、火山爆発に伴い励起される地震（爆発地震）の発生から約1秒間は、火口底からの火山物質の噴出に先行して火道の収縮現象が起きている

ことが示唆された。この収縮量と爆発地震の最大振幅には正の相関がある。この結果は、爆発直前に火道浅部で起きる収縮現象が噴火規模に影響を及ぼしていることを示している。また、観測を開始したインドネシアのスラウェシ島北部に位置するロコン (Lokon) 山においても、爆発に伴い励起される地震波は、巨視的には桜島や諏訪之瀬島のブルカノ式噴火に伴って観測される地震波の特徴と類似していた。これらは、ブルカノ式の爆発は、地震に共通の物理過程が内在することを示している。霧島山新燃岳の2011年噴火活動においては、火道深部から供給される火山ガスが強度の高いマグマのある火道浅部で停留し、この高強度のマグマが破壊することで爆発が発生すると推察された。また、火道深部からの火山ガスの供給は時間経過と共に指数関数的に減少していくことが明らかになった。これらの成果により、ブルカノ式噴火の発理解が深まるだけでなく、先行現象と噴火発生や規模との幾つかの経験的關係が明らかになった。

#### ・噴火の推移と多様性の把握

火山ガス観測による火道内揮発性成分挙動の理解も深まった。浅間山では、2007-2010年の火山ガス観測から、2009年の微噴火前後で地震を励起しながら地表に放出された火山ガスの割合が変化し、火山地下の脱ガス機構の変化が起きたことが示唆された。また、火山ガス（二酸化硫黄）放出率の自動連続測定により、ほぼ2-3 kg/sの放出率で火山ガスが放出されていること、時折短時間に10kg/s程度の放出率が観測されることが分かった。短時間の高い放出は、地震発生に対応するものもある一方で、無関係なものもあることが分かった。桜島における約30回の爆発に伴う二酸化硫黄放出率変動観測からは、必ずしも噴火直前に二酸化硫黄放出率が減少するわけではないことが明らかになった。これらの結果は、地震や噴火活動と相関のある火山ガス活動の変化が起きていることを示す一方で、多様性があることを示している。

#### （４）地震発生・火山噴火の素過程

より信頼性の高い地震発生モデルを構築するために必要な、地震発生の各過程を支配する破壊・摩擦構成則の素過程を理解するための実験的・理論的研究を行った。時空間的スケールが数桁以上異なる自然地震へ室内実験の知見を適用することの妥当性を検討するために、摩擦・破壊現象の規模依存性を明らかにするための実験・観測を行った。

破壊エネルギーを支配する主要因である臨界滑り量 ( $D_c$ ) は、従来の低速滑り実験では1mm程度以下と見積もられてきたが、最近低速滑りでも数十cmという長い  $D_c$  が生じ得ることを発見されている。厚い粉体層をはさんだ高速滑り実験を行ったところ、10mクラスの長大な  $D_c$  をもつ摩擦の緩和を見出した (図13)。この緩和の原因は粒子自体の物性変化ではなく、多体粒子系の構造変化が原因であることと考えられる。

回転式中-高速摩擦試験機を用いて、中米コスタリカ沖のこれから沈み込む地点で採取された堆積物について行った摩擦実験の結果、高速滑りでの摩擦係数が低速滑り時の半分以下に低下するという著しい速度弱性の性質を示すことが明らかになった。

南アフリカ鉱山で観測した薄い面状のクラスターを示す AE に対して、特に高精度の震源決定を行ったところ、AE クラスターの厚さは薄いものでは50cm程度と、非常に密集した面状分布を示すことが分かった。面状クラスターを構成する AE の多くは、通常の鉱山地震観測網では検知できない非常に小さい破壊イベントである。このような AE についても、サイズ分布は地震と同様にべき乗則に従うことが確認された。

#### ・マグマの分化・発泡・脱ガス過程

地震と空振のデータに含まれる様々な情報を適切に整理し解析する手法を開発し、その手法を用いて霧島山新燃岳において2011年1月26日から27日に起こった3回の噴火を調べた。その結果、3回の噴火で火道内過程に違いがあることが分かり、これまでの室内実験の結果と併せることにより、観測データから噴出率の推移予測できる可能性が示された。

### 3-3. 新たな観測技術の開発

#### (1) 海底における観測技術の開発と高度化

東北地方太平洋沖地震の発生で、プレート間の固着状態、特に、海溝付近での状態把握が、プレート境界で発生する巨大地震発生の評価に、極めて重要であることが明らかになった。発生が懸念される南海トラフ地震を考慮すると、水深の大きい海溝付近での海底観測装置の開発は、喫緊の課題である。

海中音波を用いて海底に設置した基準点間の距離の伸縮を計測する観測装置では、これまで水深2000～3000mで基準点間2km程度までしか測定することしかできなかったが、測距に用いる発信音波の波形、返信音波の強度、記録装置の改良を行い、水深6000mで基準点間3kmまで測定可能な大深度・長基線対応型の海底間音響測距装置の開発を行った。実用化を目指して、長期連続試験を実施し、その有効性を検証する。

海底の上下変動を検知する海底圧力計は、地殻変動の観測だけでなく、津波を早期に検知できる重要な装置であるが、これまで深海での設置は行われていなかった。深海での有効性を検証するため、水深6900mの海底で試験観測を行った。深海ではセンサーのドリフトが大きくなり、今後、対策・補正の課題が明らかになった。

水深6000mを超える深海での地震観測を可能にするチタン球を用いた超深海用長期型海底地震計の開発では、過去の試験的観測での結果を考慮して、耐圧性能を中心に構造を根本的に見直した。2012年11月～2013年2月に試験観測を行い良好な結果を得た。また、ガラス球を用いた海底地震計についても、水深6000mを超える超深海底に設置可能なものを開発し、試験観測を行った。

以上のように、海溝付近での大水深での観測を可能にする観測装置の開発が、着実に進められている(図14)。

#### (2) 宇宙技術等の利用の高度化

リアルタイムGPS時系列を用いた地震時変位の自動検知及び地震時変位量推定アルゴリズムの改良を行い、地震発生から60秒以内に「地震発生」を判定できるアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムは大学で開発され、国土地理院において試験運用が進められているリアルタイムGPS解析システム(プロトタイプ)に実装されている。大学の研究成果が現業部門に利用されることとなった好例の一つである。

SARによる地殻変動観測技術を向上させ、越後平野及びその周辺での、年間約5mmから1cmで進行する地盤沈降が抽出できるようになった。東北地方太平洋沖地震に伴う東日本火山周辺の地殻変動の検出に成功した。変動のパターンは火山周辺に楕円状に沈降するパターンが見られ、火山下に存在する軟らかい媒質に地震に伴う伸長変動が集中したことによると考えられる。

### (3) 観測技術の継続的高度化

宇宙線ミュオン透視装置とアルゴリズムの改良を進め、有珠山で山体の厚さ1500mまで密度構造を精度よく求めることができた。また、この開発により、透視限界が2~4倍程度延伸でき、応用範囲が広がった。

桜島火山に精密制御信号システム（アクロス）を設置し、7日間の観測データから、約20 km 離れた桜島の外の観測点でもアクロス信号を検出できることが確認できた。火山周辺における地殻構造の時間変化と火山活動の関係を明らかにすることを試みる。

#### 3-4. 超巨大地震に関する当面実施すべき観測研究の推進

平成 21 年度から始まった「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」では、平成 23 年に発生した東北地方太平洋沖地震のような M9 クラスの超巨大地震の発生予測の観測研究の推進が十分ではなかった。そのため観測研究計画が見直され、平成 24 年度から新たに、超巨大地震の発生機構とそれに起因する現象を解明する観測研究、及び超巨大地震やそれに起因する現象を予測するための観測研究、更にはこれらの解明と予測のための観測研究に必要な新技術の開発を行う研究が実施されることとなった。

##### (1) 超巨大地震とそれに起因する現象の解明のための観測研究

東北地方太平洋沖地震前後に発生した地震を用いた上盤プレート内の応力場の変化から、地震時の大滑り域が地震前に固着していたこと、地震時の滑りにより蓄積されていた応力がほぼ解放されたことが示された。また、約 30 年間にわたる小繰り返し地震データから、東北地方太平洋沖地震発生前後のプレート境界の非地震性滑りの時空間発展が推定された。その結果、本震発生時に大きく滑った宮城沖では、本震発生前の平均滑り速度が他の領域に比べて小さいこと、さらに、間欠的な滑りが頻繁に生じていたことが明らかとなった。一方、その周辺域では、本震発生前の平均滑り速度が大きく、定常的な滑り、あるいは数年~10 年にわたる M6~7 クラス地震の余効滑りが見られた（図 15）。本震発生後、本震時の大滑り域では小繰り返し地震がほとんど起きていないことも分かった。このことは、本震時の大滑り域でほぼ応力が解放されたことを示唆する。一方、本震時の大滑り域の周辺では、小繰り返し地震の活発な活動が見られ、プレート境界面上で進行する余効滑りによる影響と考えられる。これまで、幾つかの大地震の余効滑りに対して、滑り速度の対数に比例してせん断応力が増大する線形関係を示すことが推定されてきたが、東北地方太平洋沖地震の余効滑りでは、これらが非線形の関係を示し、滑り速度が大きくなるにつれて摩擦滑りの安定性が抑制されることが示された。

東北地方太平洋沖地震後に生じた誘発地震活動の多くは、本震のプレート境界面上での滑りによるクーロン破壊関数の静的変化（ $\Delta CFF$ ）でおおむね説明できるが、それに反する観測もある。これは間隙流体圧の上昇に伴う断層強度の低下が重要な役割を果たした可能性が考えられる。顕著な誘発地震活動域では明瞭な震源移動が観測されており、流体の拡散が地震発生に影響を与えている可能性がある。また、これらの誘発地震活動域の深部には地震波速度の低速度域が見られる場合が多く、流体の関与を支持する。

## (2) 超巨大地震とそれに起因する現象の予測のための観測研究

東北地方太平洋沖地震後のプレート境界での固着状況を明らかにするために、太平洋沖での海底地殻変動観測を継続した。本震時の震央周辺の宮城沖・釜石沖では複雑な変動を示すが、おおむね西方向の地殻変動が観測された。一方、福島沖及び銚子沖では、プレート境界での余効滑りを示すプレートの沈み込み方向と逆方向の変動が検出されており、時間とともに滑り速度が減衰する様子が捉えられた。また、南海トラフから陸域までの連続的な地殻変動プロファイルを得るために、南海トラフの海溝軸付近に新たな海底局を設置した。

東南海地震震源域における地殻変動のリアルタイムデータを用いたデータ同化研究を推進した。1996年以降の西南日本で観測された上下変動データにおおむね整合するシミュレーション結果が得られた。

## (3) 超巨大地震とそれに起因する現象の解明と予測のための新技術の開発

東北地方太平洋沖地震の発生時に大きな滑りが生じた日本海溝軸近傍において、海底圧力連続観測を開始した。観測地点の水深は、従来海底圧力観測を行ってきた海域に比べてはるかに深い（約7000m）、耐圧容器・水中ケーブルは耐圧9000m相当のもの、圧力センサーはフルスケール7000mのもので観測システムを作成し、海溝軸付近に設置した。さらに、海底間音響測距装置を開発し、水深6000mの緩やかな斜面に基線長3kmで2台を対に設置し海底間測距を試みた。

津波堆積物の検出のために、下北半島、仙台平野、北茨城、房総半島の沿岸低地において、ボーリングなどによる地層のコア採取を行い、さらに、仙台湾では海底表層の地層コア採取を実施した。和歌山県串本町では津波石の分布の正確な把握のため、地上レーザー計測を実施した。